CARL VON OSSIETZKY universität OLDENBURG

Der Goos-Hänchen Effekt
- neue Einblicke in die Totalreflexion-

Präsentation von: Jens Brauer

am: 15.12.2011

Gliederung

- Vorstellung des Experimentes von Goos und Hänchen
- Vorstellung der Ergebnisse von Goos und Hänchen
- Polarisationsabhängigkeiten
- Gekrümmte dielektrische Grenzflächen
- Fresnel Filtering Effekt
- Einheitliches analytisches Modell mit Berücksichtigung des GH und FF - Effekts
- Zusammenfassung

Allgemein gilt:

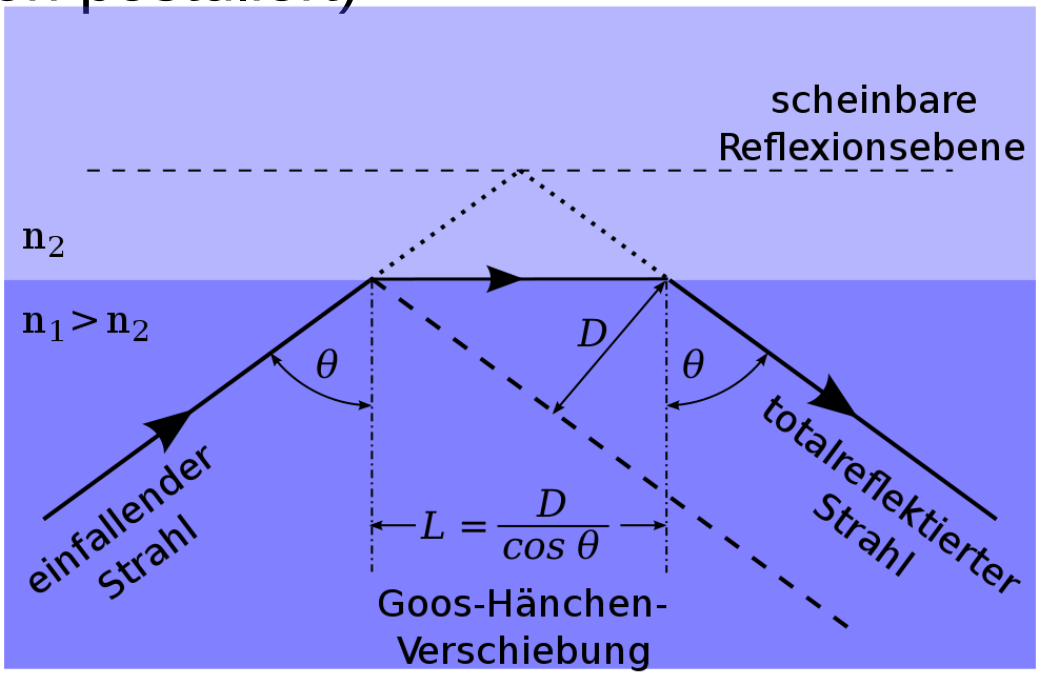
- Snelliussches Brechungsgesetz und Fresnelsche Formeln bestimmen WW an der Grenzfläche
- Totalreflexion, wenn $\theta > \theta_c = \arcsin(n_2 / n_1)$ mit $n_2 < n_1$
- Maxwellsche Theorie besagt weiterhin, dass Lichtenergie in das dünnere Medium eintritt
- Nachweis der Energie nur durch Messen im dünneren Medium
  - Macht die totale Reflexion zunichte

Experiment von Goos und Hänchen

- Lichtenergie tritt an bestimmten Stellen in dünneres Medium ein und kommt an anderer Stelle wieder heraus (von Newton postuliert)

- -> Verschiebung

des totalreflektierten Strahles

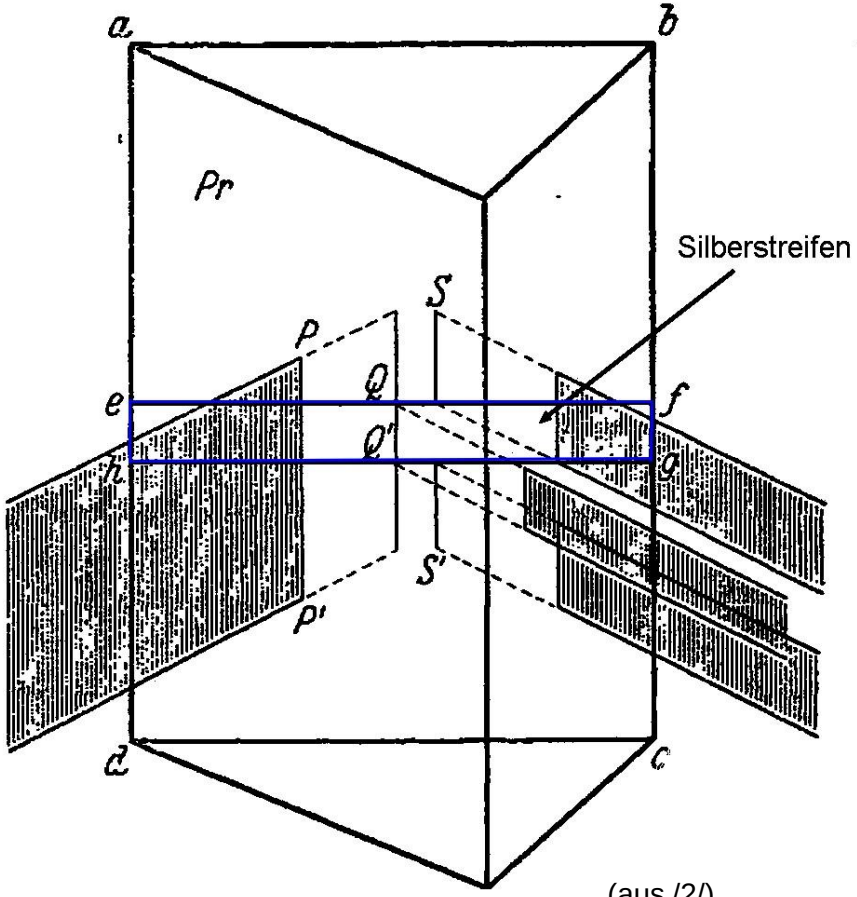


(aus /1/)

Versuchsanordnung:

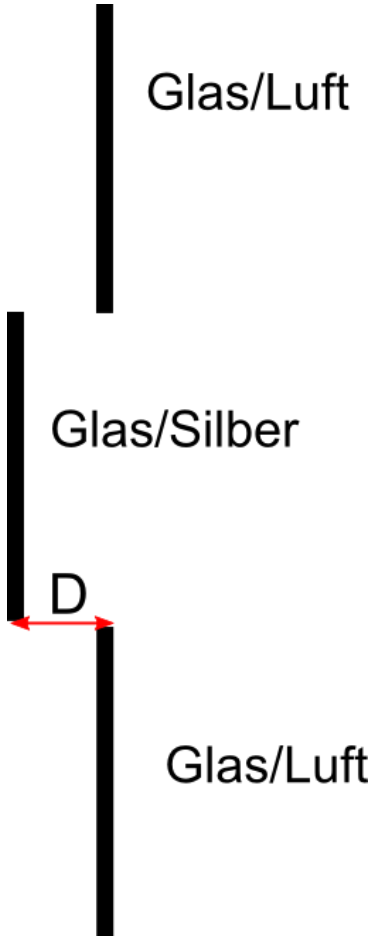
- Anforderungen:
  - Verwirklichung des „gedachten“ Strahles
  - Strahlversetzung D mit großer Genauigkeit messen

- Realisierung
  - 50 µm Silberschicht auf Glas
  - Reflektiert 95% des Lichtes nahezu unabhängig der Wellenlänge
  - Licht tritt nur einige µm in die Schicht ein; weniger als 1% verglichen mit der Totalreflexion



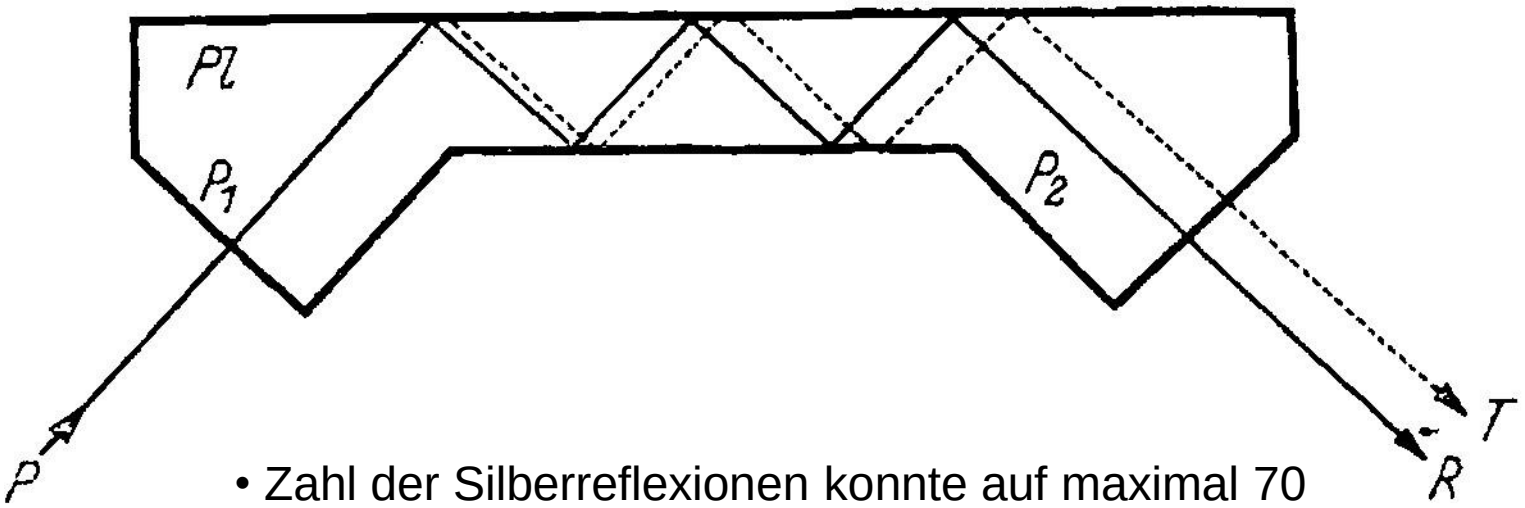
(aus /2/)

Ergebnis: Spur auf photographischer Platte



Strahlversetzung D ist sehr klein

-> Effekt vergrößern durch planparallele Platte



• Zahl der Silberreflexionen konnte auf maximal 70 gebracht werden

(aus /2/)

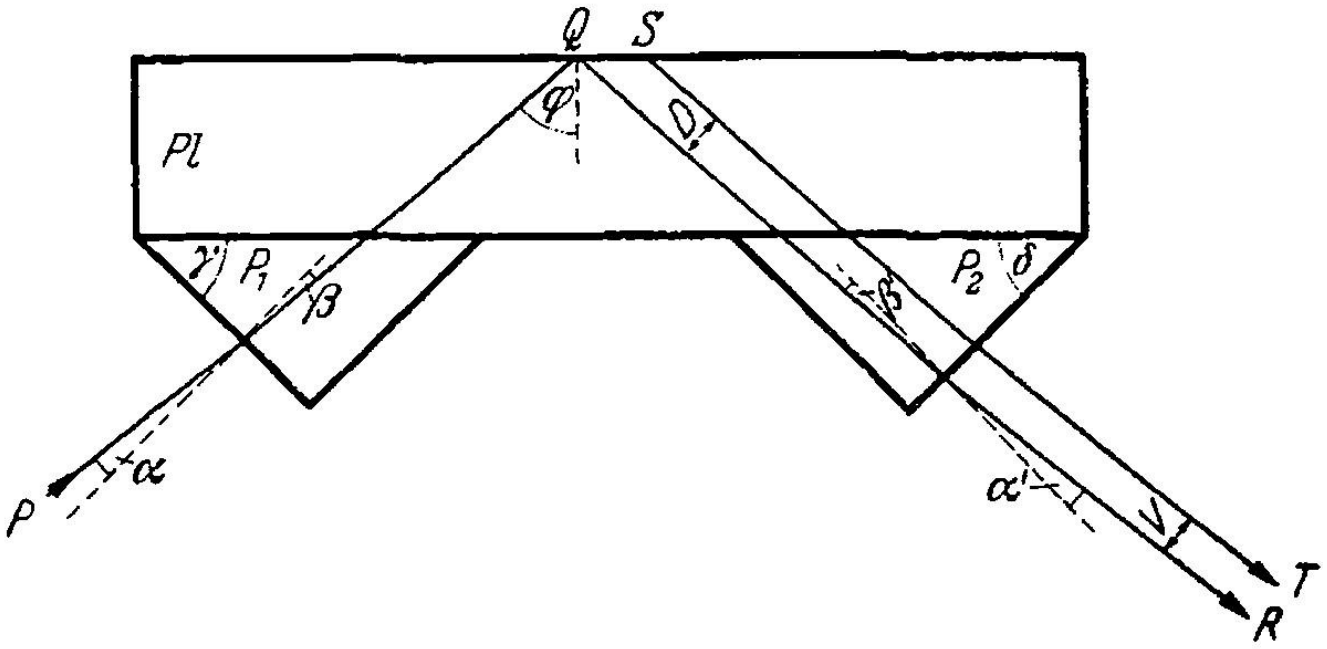
• Strahlversetzung schon mit bloßem Auge sichtbar und gute Genauigkeit beim Messen

Modifizierter Versuch:

- Strahlversetzung D nimmt mit wachsender Wellenlänge zu
- -> Zwischen verschiedenfarbigem Licht differentielle Strahlversetzung

- Vorteil:
  - Man braucht keinen „Nullstrahl“ mehr. Keine Silberschicht mehr nötig
- Nachteil:
  - Schwieriger zu realisieren. Teilweise ungenau.

Gemessen wurde die Strahlversetzung in Luft:



- D=V · cos(ß‘)/cos(a‘)

(aus /2/)

Ergebnisse

- Strahlversetzung nimmt zu, je näher man sich dem Grenzwinkel der Totalreflexion φ_c nähert

- Nach Maxwell gilt: Die in das dünnere Medium eintretende Lichtenergie stellt eine quergedämpfte Welle dar (evaneszentes Wellenfeld)

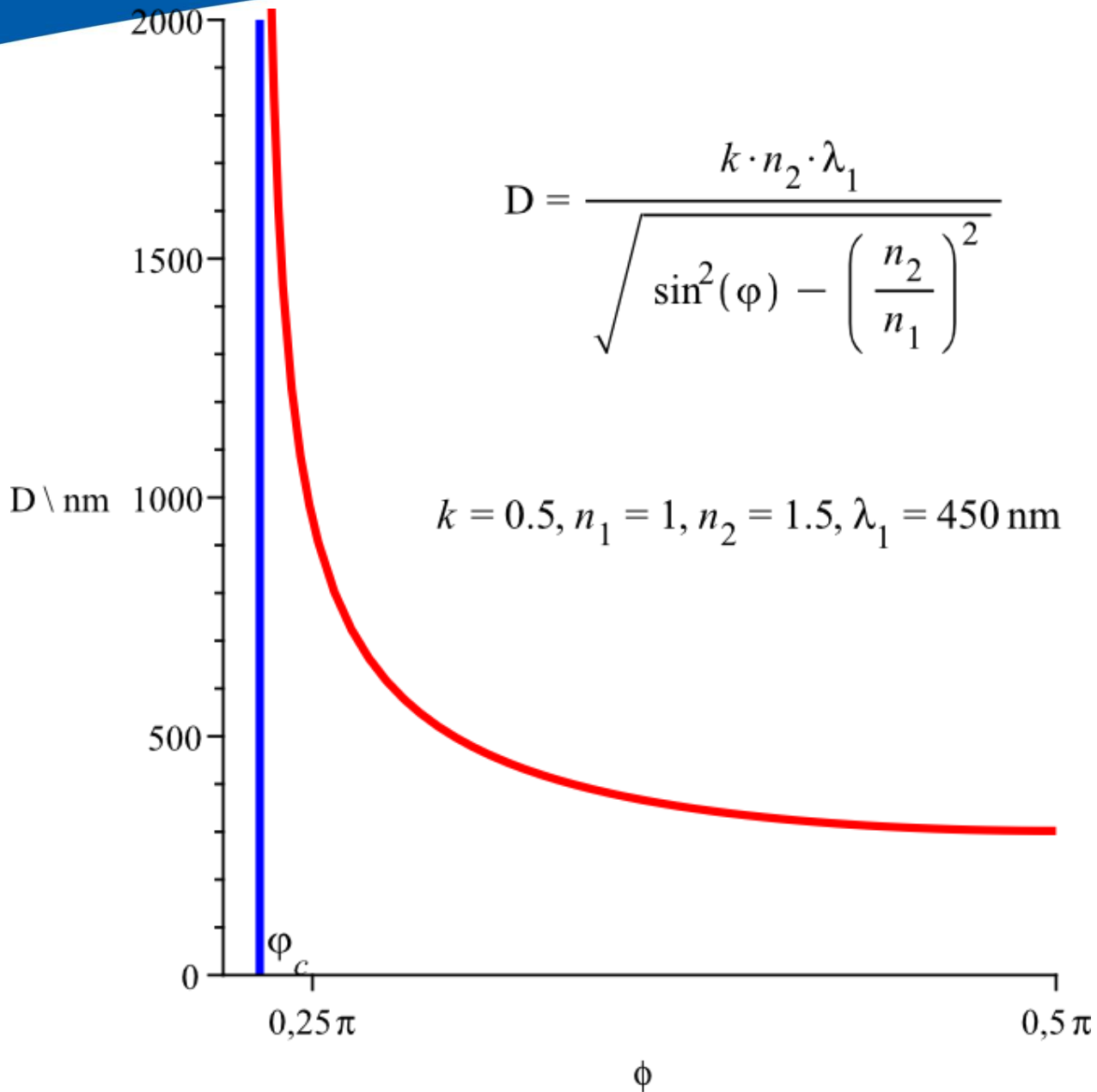
- Amplitude exponentiell abfallend mit exp(-z/δ)

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{\sin^2(\varphi) - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}$$

- Experimente von Goos und Hänchen haben gezeigt, dass gilt:

$$D = k \cdot n_2 \cdot \lambda_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin^2(\varphi) - \sin^2(\varphi_c)}}$$

- mit einer Konstanten k
- Strahlversetzung hängt direkt mit Eindringtiefe zusammen



$$D = \frac{k \cdot n_2 \cdot \lambda_1}{\sqrt{\sin^2(\varphi) - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}}$$

$k = 0.5,\ n_1 = 1,\ n_2 = 1.5,\ \lambda_1 = 450\,\text{nm}$

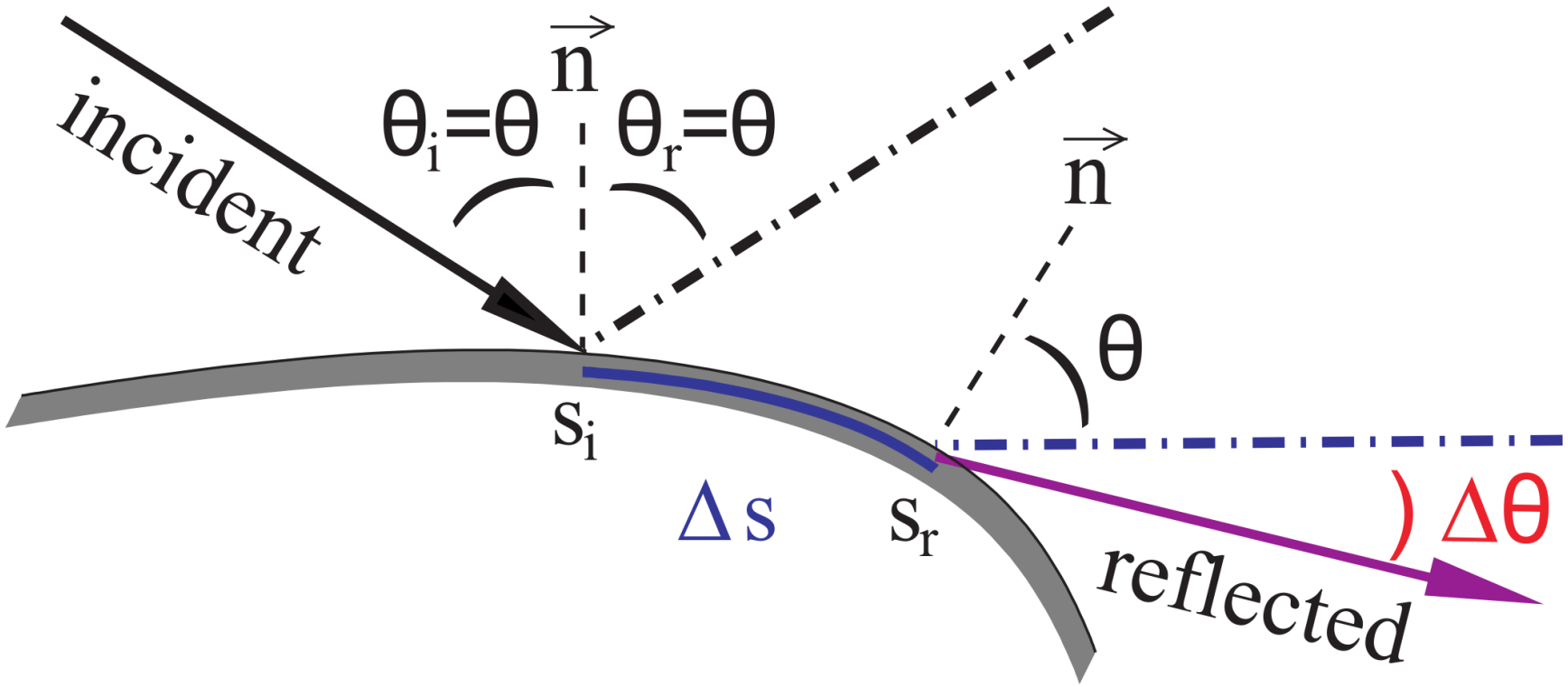
Grenzfall: $\varphi=\varphi_c$

- D würde unendlich groß werden
- Die in das dünnere Medium eintretende Lichtenergie längs der Grenzfläche würde bis ins Unendliche laufen
- Nach Maxwell ist die Welle dann homogen, also nicht mehr quergedämpft
- D.h. man hat keine evaneszente Welle mehr. Die komplette Welle tritt in das 2. Medium ein!

Polarisationsabhängigkeiten

- Es wurde gezeigt, dass für einen Strahl parallel polarisiert zur Einfallsebene ein Maximum der Strahlversetzung D existiert
- Für einen senkrecht zur Einfallsebene polarisierten Strahl existiert ein Minimum von D
- -> Ein unpolarisierter Lichtstrahl wird aufgespalten

„Curved dielectric interface“



(aus /3/)

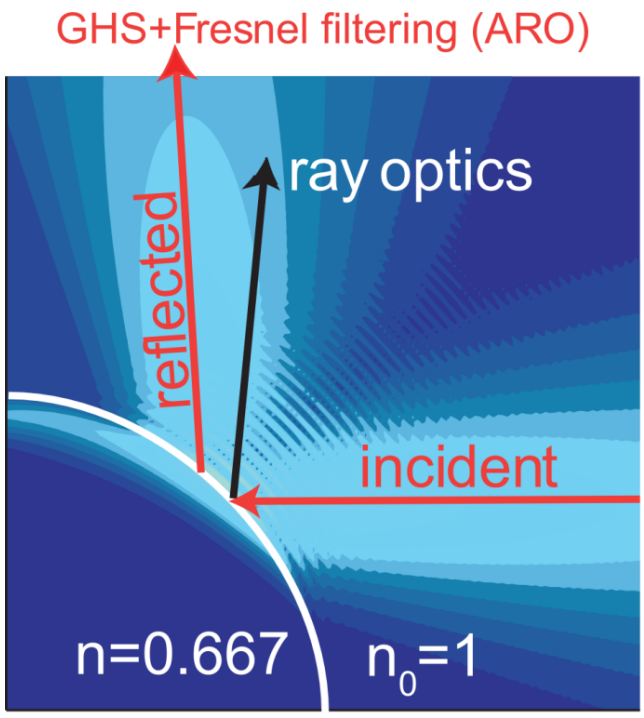
Fresnel Filtering Effekt

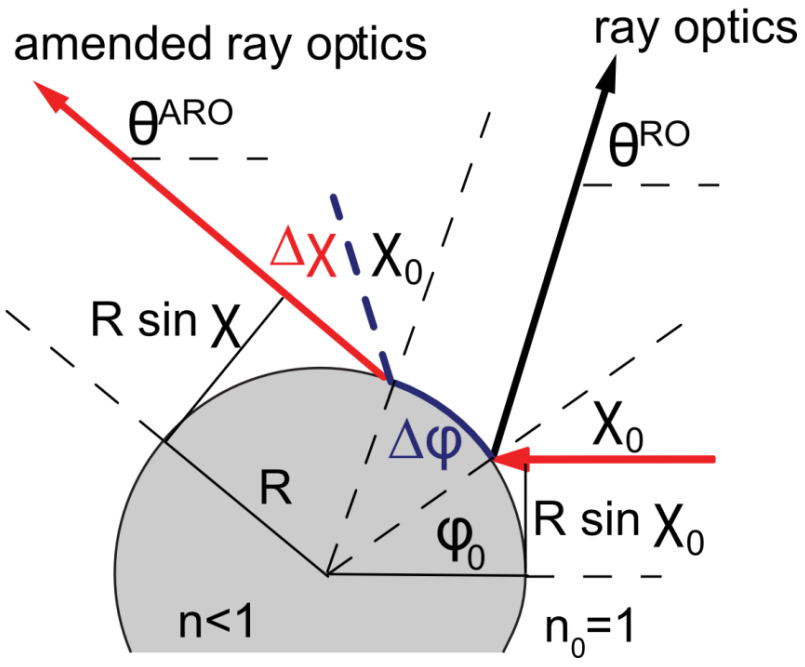
- In Realität hat man ein „Paket“ aus Lichtstrahlen mit Einfallswinkeln θ_b um mittleren Einfallswinkel θ_i zentriert

- Wenn $\theta_i \approx \theta_c$ erfahren die Winkel größer θ_i Totalreflexion und die Winkel kleiner als θ_i Brechung.

- Dadurch ist der mittlere Winkel des reflektierten Strahles automatisch größer als der mittlere Einfallswinkel $\theta_r > \theta_i$

„Curved dielectric interface“





Henschel,M. und Schomerus,H, *Correcting Ray Optics at Curved Dielectric Microresonator Interfaces: Phase-Space Unification of Fresnel Filtering and the Goos-Hänchen Shift,* 2006, Physical Letter Reviews

- Berechnung der Reflexion von Gauß-Strahlen an kugelförmigen dielektrischen Grenzflächen

  (z.B. von optischen Mikroresonatoren)

- Henschel und Schomerus:
  - Berücksichtigung des GH-Effekts und des Fresnel-Filtering Effekts
  - Berechnung der Strahlen in einem speziellen Phasenraum, in dem eine Koordinate mit Einfalls- bzw. Ausfallswinkel an der Grenzfläche verknüpft ist und eine Koordinate mit dem entsprechenden Einfalls- bzw. Ausfallswinkel
  - Berechnung über Wellenfunktion

Hankel –Funktion

$$\Psi_{\text{in}}(r,\phi) = \sum_m c_m^- H_m^-(kr) e^{im\phi}$$

$$c_m^- = e^{i[\chi_0 - \phi_0 - (\pi/2)]m - (w^2/2)(m - kR\sin\chi_0)^2}$$

$$\Psi_{\text{refl}}(r,\phi) = \sum_m c_m^+ H_m^+(kr) e^{im\phi}$$

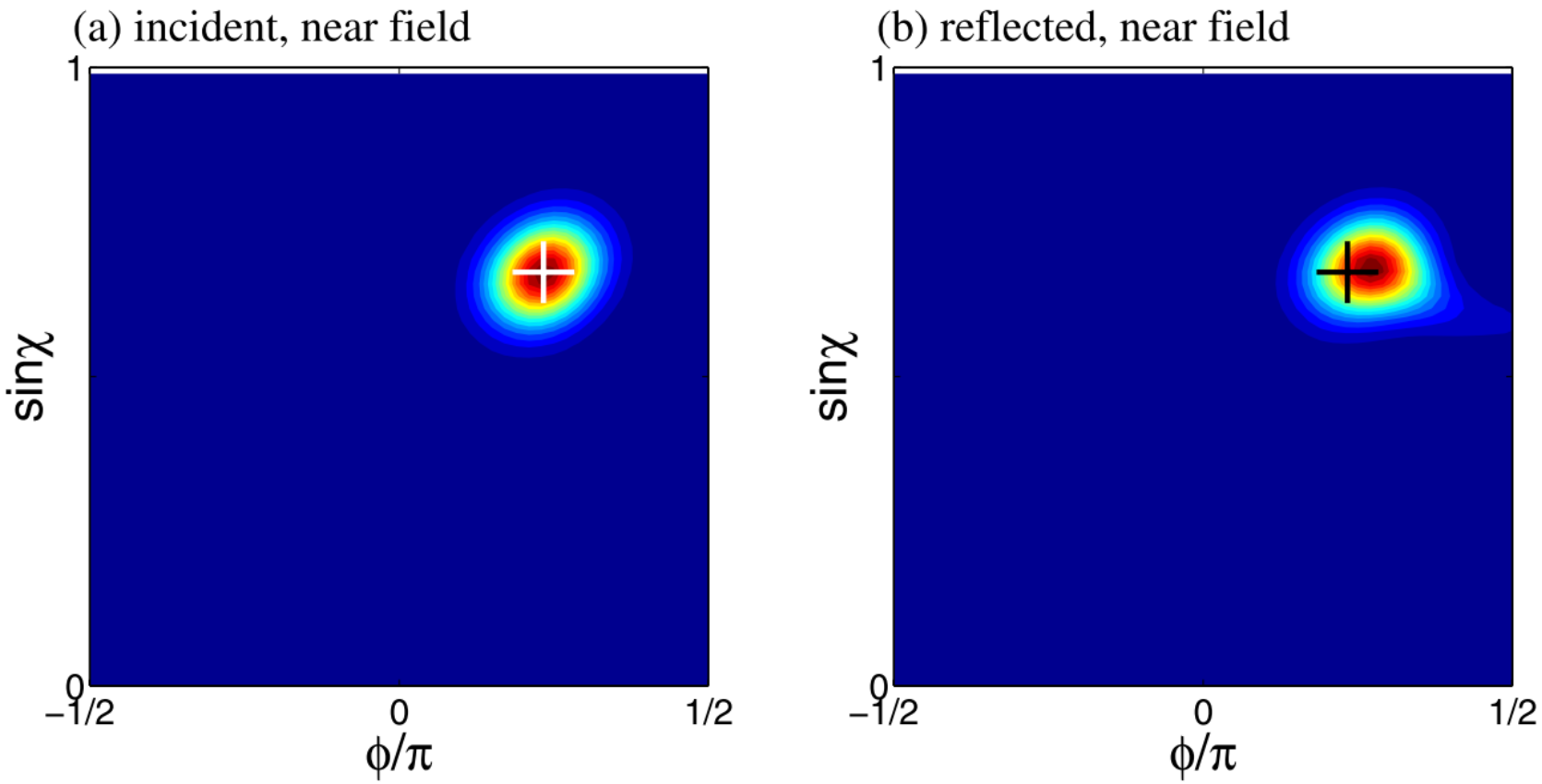
Bessel-Fkt.

$$c_m^+ = c_m^- \frac{nJ_m'(nkR)H_m^-(kR) - H_m^{-\prime}(kR)J_m(nkR)}{H_m^{+\prime}(kR)J_m(nkR) - nJ_m'(nkR)H_m^+(kR)}$$

$$\mathcal{H}^{\pm}(\phi, \sin\chi) = \cos\chi \times \left| \sum_m c_m^{\pm} H_m^{\pm}(kR) e^{i(m - kR\sin\chi)\phi - (w^2/2)(m - kR\sin\chi)^2} \right|^2.$$

Husimi – Funktionen für Nahfeld an dielektrischen Grenzflächen

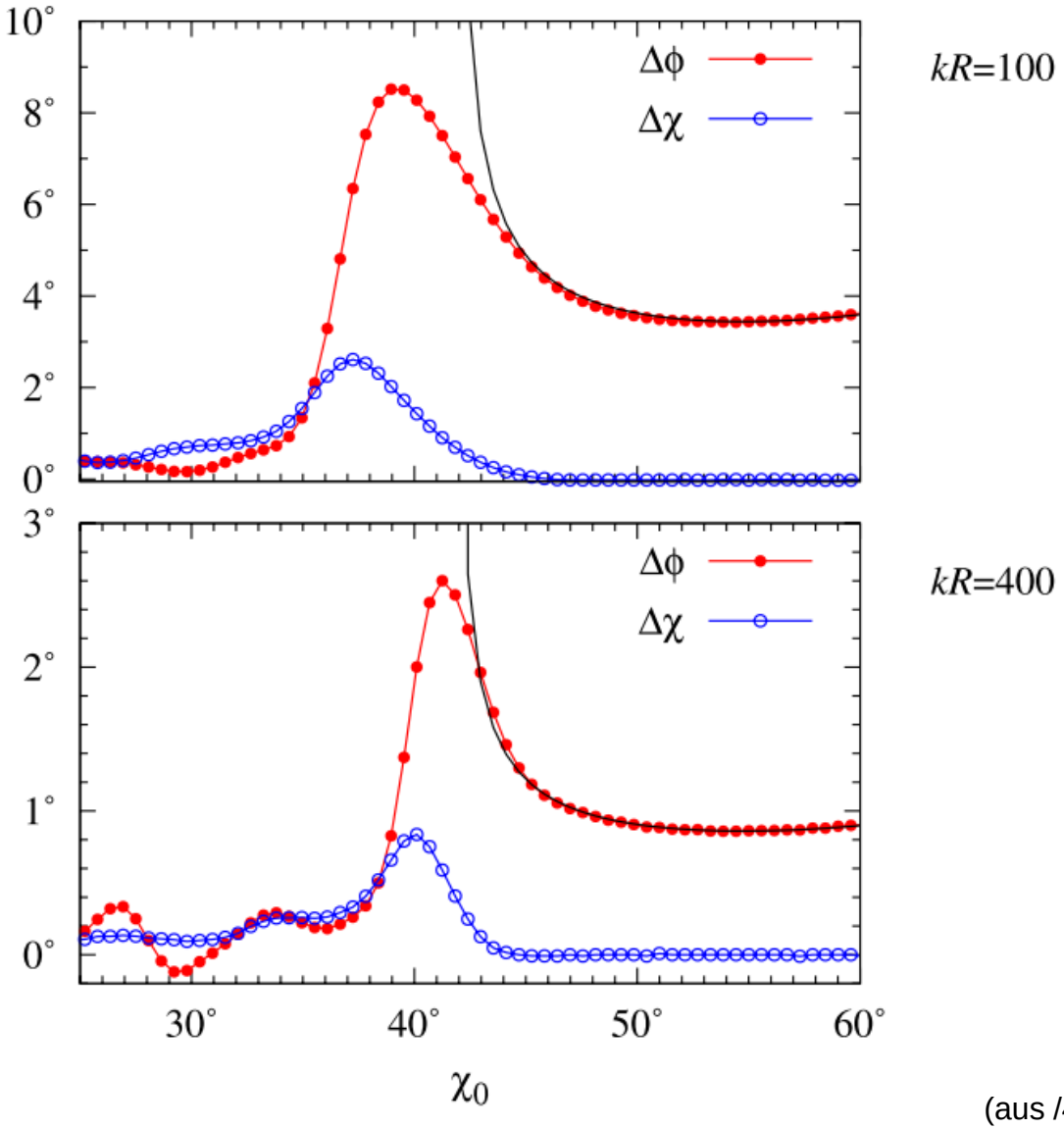
(aus /4/)



Maximale Phasenraumdichte stimmt links gut mit Strahlenoptik überein, „+“ bei (X_0 , sin(X_0)). Rechts: Abweichungen von Strahlenoptik!

- Abweichung in sin(X) – Richtung = Fresnel Filtering Effekt
- Abweichung in Φ – Richtung = Goos-Hänchen Effekt

$$\Delta\Phi = \Phi_{max} - \Phi_0$$



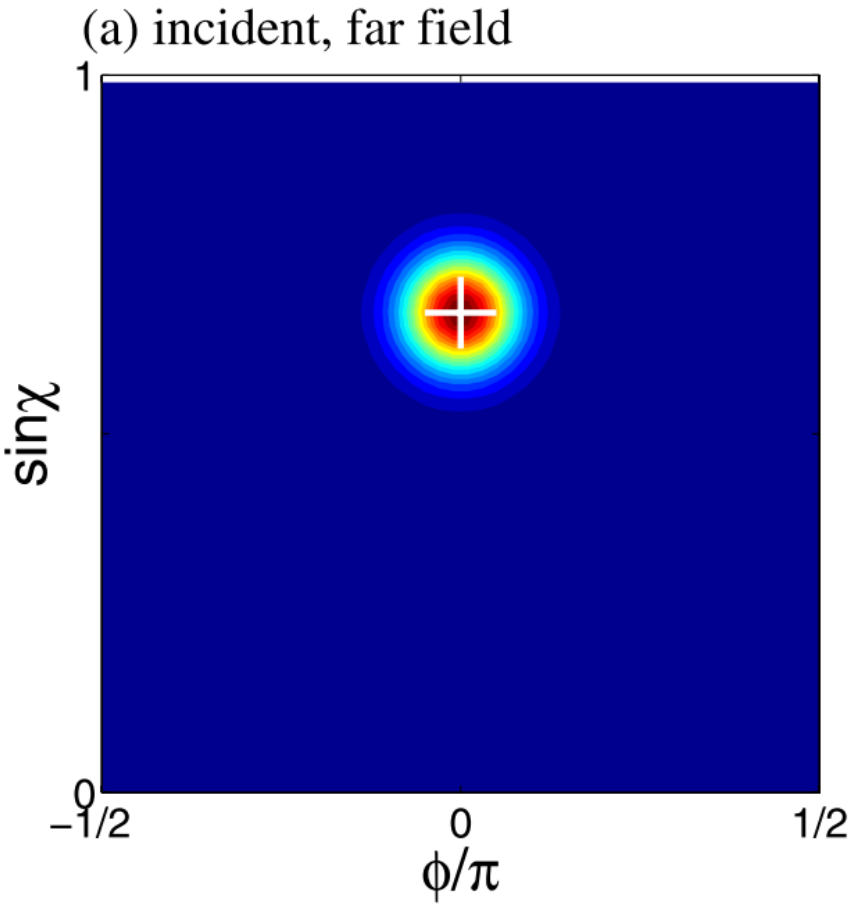
Kritischer Winkel bei ca. 41,8°

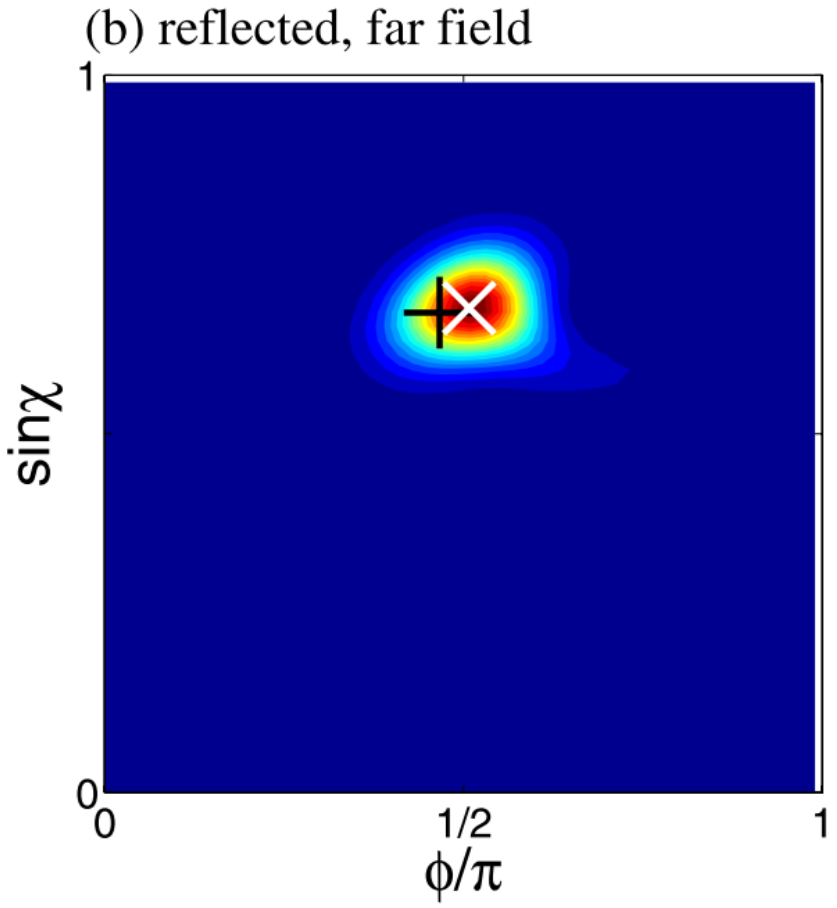
Dort ist die Abweichung am größten.

Für größere Winkel als den kritischen Winkel stimmen die Werte mit den klassischen Werten nach Artman für Totalreflexion an ebenen Grenzflächen überein.

(aus /4/)

Ähnliche Ergebnisse auch für das Fernfeld:





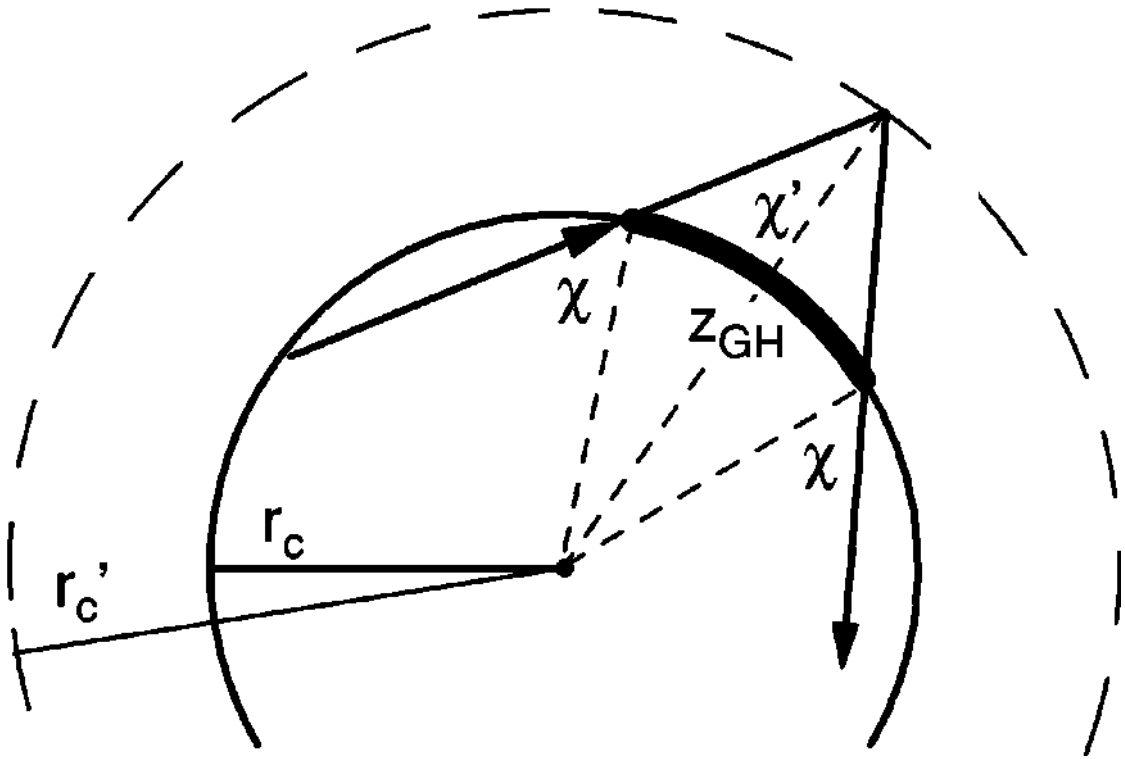
Korrekturen an den Fresnel‘schen Gleichungen

- Mikroresonatoren oft so klein, dass die Krümmung des Randes nicht vernachlässigt werden darf
- Herkömmliche Herangehensweise: Reduktion der Reflexionswahrscheinlichkeit aufgrund größerem Tunneleffekt

- Neuer Ansatz: Das Modell der Strahlenoptik beibehalten und Einbezug des GH-Effekts

- Bei gekrümmten Grenzflächen: Reduktion der Reflexionswahrscheinlichkeit, da Einfallswinkel an „effektiver Grenzfläche“ kleiner als an „physikalischer Grenzfläche“

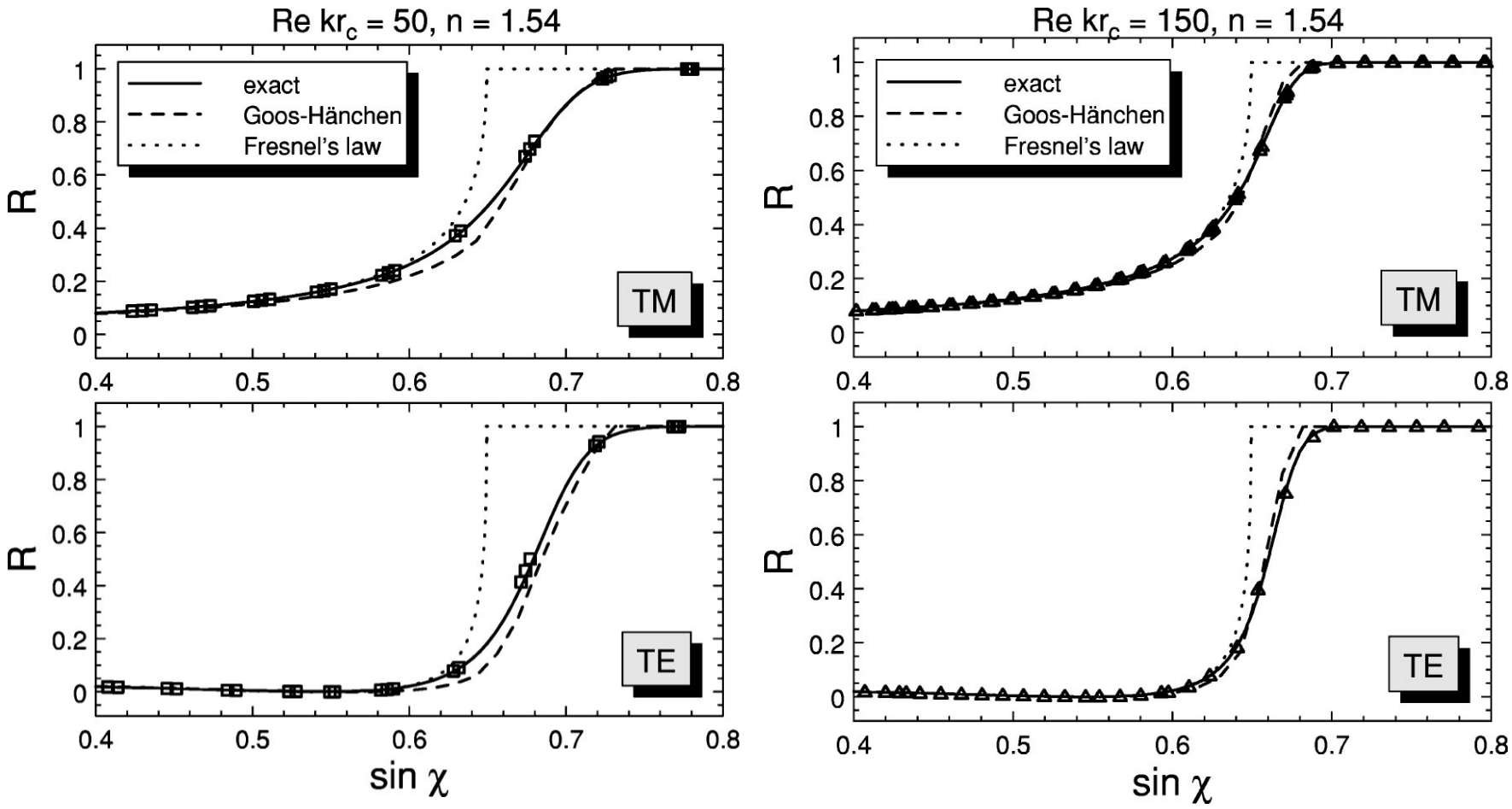
Reflexion scheint an Grenzfläche mit Radius r_c‘ unter einem kleineren Einfallswinkel zu erfolgen



(aus /5/)

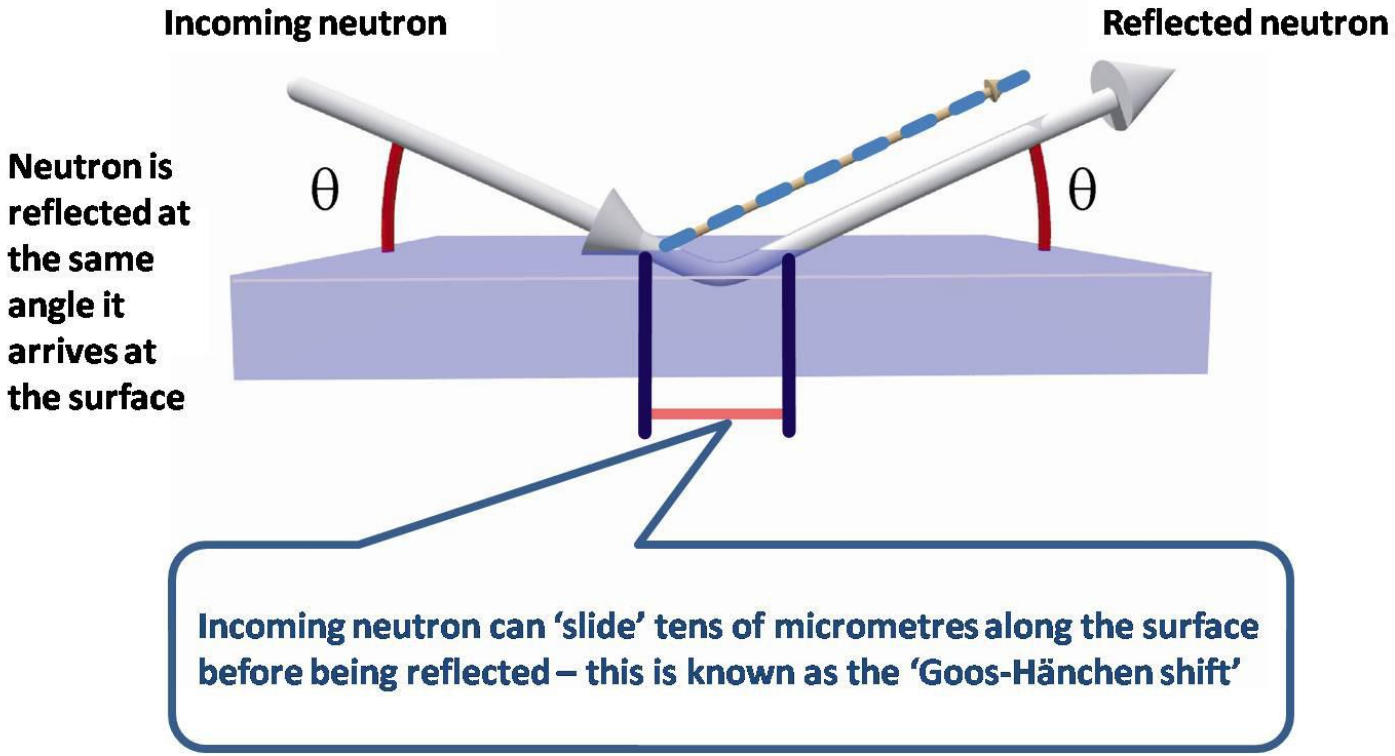
Ergebnisse:

(aus /5/)



-> Für große Wellenzahlen ist Berechnung mit Goos Hänchen ununterscheidbar von den analytisch „exakt“ berechneten Werten

GH-Versetzung in anderen Bereichen:



(aus /6/)

Zusammenfassung

- Goos-Hänchen Effekt = Längsverschiebung des reflektierten Strahles bei der Totalreflexion
- Die Welle wird an einer „virtuellen“ Ebene im dünneren Medium reflektiert
- Grad der Verschiebung ist abhängig von der Eindringtiefe der evaneszenten Welle ins dünnere Medium
- GH-Verschiebung ist polarisationsabhängig

CARL VON OSSIETZKY universität OLDENBURG

Quellen

- /1/ http://de.wikipedia.org/wiki/Goos-H%C3%A4nchen-Effekt
- /2/ **F. Goos, H. Hänchen: *Ein neuer und fundamentaler Versuch zur Totalreflexion.* In: *Annalen der Physik.* 436, Nr. 7–8, 1947, S. 333–346**
- /3/ Altman,E.G, Magno,G.Del und Hentschel,M.: *Non-Hamiltonian dynamics in optical microcavities resulting*

  from wave-inspired corrections to geometric optics
- /4/ Hentschel,M. und Schomerus,H: *Correcting Ray Optics at Curved Dielectric Microresonator Interfaces:*

  Phase-Space Unification of Fresnel Filtering and the Goos- Hänchen Shift, 2006, Physical Letter Reviews
- /5/ Hentschel,M und Schomerus,H.: *Fresnel laws at curved dielectic interfaces of microresonators,* The American Phsyical Socitey,2002
- /6/ http://www.stfc.ac.uk/resources/image/jpg/Diagram.jpg
- Jackson, J.D., Witte, C. und Müller, K. :*Klassische Elektrodynamik*, de Gruyter Verlag, 2006
- Chiu,K.W. und Quinn,J.J., *On the Goos Hänchen Effect:A Simple Example of a Time Delay Scattering Process*, 1972